

, ³ Kazan Federal University,

УДК 537.525

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДПРОБОЙНОЙ СТАДИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ ¹⁾

А.Ф. ГАЙСИН¹, В.С. ЖЕЛТУХИН², В.Ю. ЧЕБАКОВА³, Д.Н. МИРХАНОВ²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева,

² Казанский национальный исследовательский технологический университет

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail almaz87@mail.ru; vchebakova@mail.ru; vzheltukhin@gmail.com

SIMULATION OF THE PRE-BREAKDOWN STAGE OF CAPACITIVE COUPLED RF DISCHARGE WITH ELECTROLITE ELECTRODE AT LOW PRESSURE

A.F. GAISIN¹, V.S. ZHELTUKHIN², V.Yu. CHEBAKOVA³, D.N. MIRKHANOV²

¹ Tupolevs Kazan National Research Technical University

² Kazan National Research Technological University

Аннотация

Построена математическая модель, описывающая начальную стадию высокочастотного емкостного разряда с жидким электродом. Построенная математическая модель позволяет оценить основные характеристики аргона в промежутке между водой и нагруженным электродом.

Ключевые слова: Математическая модель, ВЧ разряд, пониженное давление, жидкий электрод

Summary

The mathematical model describing an initial stage of the high-frequency capacitor category with a liquid electrode is constructed. The constructed mathematical model allows us to estimate the main characteristics of argon between water and loaded electrode.

Summary of paper

Key words: Mathematical model, RF discharge, low pressure, electrolyte electrode.

Несмотря на большие возможности использования разряда между жидким и твердым электродами, физические процессы, протекающие в таких разрядах, мало изучены. В работе построена модель для исследования ВЧЕ-разряда в аргоне между круглыми плоскопараллельными электродами, один из которых (заземленный) погружен в воду. При построении математической модели расстояние между электродами полагается равным l , глубина электролита a . Соответственно, координата $x = 0$ соответствует заземленному электроду, $x = l$ — нагруженному, $x = a$ соответствует границе раздела двух сред: жидкости и газа.

Введем следующие обозначения: μ_e и μ_+ — подвижности электронов и ионов, D_e и D_+ — коэффициенты диффузии электронов и ионов [1], n_e и n_+ — концентрации электронов и положительно заряженных ионов, β — эффективный коэффициент рекомбинации, ν_i — частота ионизации, определяемая таунсендовской зависимостью [2], γ — коэффициент вторичной эмиссии, $\Gamma_e = -n_e \mu_e E - D_e \frac{\partial n_e}{\partial x}$ — плотность

¹⁾ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-01-00955, 14-01-00755) и Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, проект от 01.02.2014 г. № 2196)

потока электронов, $\Gamma_+ = n_+ \mu_+ E - D_+ \frac{\partial n_+}{\partial x}$ — плотность потока ионов, E — напряженность электрического поля, n_m — концентрация метастабилей, R_1 и R_2 — коэффициенты процессов ступенчатой и пеннинговой ионизации.

При $0 < x < l$, $t > 0$ модель включает в себя следующие уравнения (при использовании аргона в качестве плазмообразующего газа):

1. Уравнение конвекции—диффузии для электронного газа

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_e \frac{\partial n_e(x, t)}{\partial x} - \mu_e n_e(x, t) E(x, t) \right) = \\ = \nu_i n_e - \beta n_e n_+ + R_1 n_m n_e + R_2 n_m^2, \end{aligned}$$

с граничными условиями при $x = l, a$

$$\begin{cases} \Gamma_e = -\gamma \Gamma_+, \text{ если поле направлено в электрод } (E \leq 0 \text{ при } x = 0, E > 0 \text{ при } x = l), \\ \frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} = 0, \text{ если поле направлено от электрода } (E > 0 \text{ при } x = 0, E \leq 0 \text{ при } x = l); \end{cases}$$

2. Уравнение конвекции—диффузии для ионного газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_+(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_+ \frac{\partial n_+(x, t)}{\partial x} + \mu_+ n_+(x, t) E(x, t) \right) = \\ = \nu_i n_e - \beta n_e n_+ + R_1 n_m n_e + R_2 n_m^2, \end{aligned}$$

с граничными условиями при $x = l, a$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Gamma_+}{\partial x} = 0, \text{ если поле направлено в электрод} \\ \Gamma_+ = 0, \text{ если поле направлено от электрода;} \end{cases}$$

3. Уравнение баланса метастабильных атомов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_m(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_m \frac{\partial n_m(x, t)}{\partial x} \right) = \\ = R_3 N n_e - R_4 N n_m - R_5 N^2 n_m - R_6 n_m - R_1 n_m n_e - R_2 n_m^2 - R_7 n_e^2. \end{aligned}$$

Здесь D_m — коэффициент диффузии метастабилей [3], N — концентрация атомов в основном состоянии, R_i , $i = 3, 4, 5, 6, 7$ — константы скорости реакций возбуждения (в круглых скобках здесь и далее обозначен порядковый номер процесса): $Ar + e \rightarrow Ar^* + e$ (3); и тушения $Ar^* + Ar \rightarrow 2 Ar$ (4), $Ar^* + 2 Ar \rightarrow Ar_2 + Ar$ (5); $Ar^* \rightarrow Ar + h\nu$ (6); $Ar^* + e \rightarrow Ar^r + e$ (7) метастабильных состояний, их значения заданы в [4].

При $x = l$ ставится граничное условие $n_m = 0$.

На границе раздела вода—газ ($x = a$) рассматриваются следующие плазмохимические процессы, преобладание которых зависит от направления поля. Если поле направлено от электрода, то на поверхности воды преобладают процессы диссоциации молекул воды: $e + H_2O + (3.2 \text{ эВ}) \rightarrow H + OH^-$ (8), $e + H_2O + (3.6 \text{ эВ}) \rightarrow H_2 + O^-$ (9), $e + H_2O + (4.25 \text{ эВ}) \rightarrow OH + H^-$ (10). Продукты диссоциации вступают в следующие реакции между собой $OH^- + O \rightarrow H_2O + e$ (11), $OH^- + H \rightarrow H_2O + e$ (12), $H^- + H \rightarrow H_2 + e$ (13), $H^- + e \rightarrow H + 2e$ (14), $2OH + H_2 \rightarrow 2H_2O + 2e$ (15). В этой фазе идет накопление отрицательного заряда O^- , который частично гасится при смене направления поля (от электрода) в следующих процессах: $O^- + Ar^+ \rightarrow O + Ar^*$, $O^- + Ar^+ + Ar \rightarrow O + 2Ar$ и $O^- + O \rightarrow O_2 + e$ (16).

В связи с этим при $x = a$ ставятся следующие граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} -D_m \frac{\partial n_m}{\partial x} = \gamma_1 \Gamma_+ n_{O^-}, E > 0 \\ \frac{\partial n_m}{\partial x} = 0, E < 0 \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} -D_n \frac{\partial n_n}{\partial x} = \gamma_2 \Gamma_+ n_{O^-}, E > 0 \\ \frac{\partial n_n}{\partial x} = 0, E < 0 \end{array} \right. ,$$

а также рассматриваются задачи Коши с нулевыми начальными условиями для следующих кинетических уравнений плазмохимических реакций:

$$\frac{\partial n_{OH^-}}{\partial t} = R_8 n_e - R_{12} n_{OH^-} n_H - R_{11} n_{OH^-} n_O ,$$

$$\frac{\partial n_{H_2}}{\partial t} = R_9 n_e + R_{13} n_{H^-} n_H - R_{15} n_{OH}^2 n_{H_2} ,$$

$$\frac{\partial n_{OH}}{\partial t} = R_{10} n_e - R_{15} n_{OH}^2 n_{H_2} ,$$

$$\frac{\partial n_{O^-}}{\partial t} = R_9 n_e - \gamma_1 n_{O^-} \Gamma_+ - \gamma_2 n_{O^-} \Gamma_+ - R_{16} n_{O^-} n_O ,$$

$$\frac{\partial n_{H^-}}{\partial t} = R_{10} n_e - R_{13} n_{H^-} n_H - R_{14} n_{H^-} n_e ,$$

$$\frac{\partial n_H}{\partial t} = R_9 n_e - R_{12} n_{OH^-} n_H - R_{13} n_{H^-} n_H - R_{14} n_{H^-} n_e ,$$

$$\frac{\partial n_O}{\partial t} = \gamma_1 n_{O^-} \Gamma_+ + \gamma_2 n_{O^-} \Gamma_+ - R_{16} n_{O^-} n_O - R_{11} n_{OH^-} n_O .$$

Константы, характеризующие указанные процессы, взяты из [5, 6] и экспериментальных данных.

4. Уравнение баланса для нейтральных атомов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_n(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_n \frac{\partial n_n(x, t)}{\partial x} \right) = \\ = \beta n_e n_+ - R_3 N n_e + R_4 N n_m - R_5 N^2 n_m + R_6 n_m \end{aligned}$$

с граничным условием $p = k T_э n_n$ при $x = l$.

Здесь D_n – коэффициент диффузии нейтральных атомов, k – постоянная Больцмана, $T_э$ – температура электрода, p – давление.

5. Уравнения Пуассона для потенциала электрического поля φ :

$$-\frac{\partial^2 \varphi(x, t)}{\partial x^2} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_+(x, t) - n_e(x, t))$$

с граничными условиями $i = \sigma \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$ при $x = a$ и $\varphi(t) = V_a \sin(\omega t)$ при $x = l$.

Здесь σ – удельная электропроводность воды, i – плотность тока на заземленном электроде, e – заряд электрона, ε_0 – электрическая постоянная, ω – круговая частота электромагнитного поля, V_a – амплитуда колебания напряжения.

Построенная математическая модель ВЧЕ-разряда с жидким электродом позволяет оценить основные характеристики аргона в промежутке между водой и нагруженным электродом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dimitris P. Lymberopoulos and Demetre J. Economou.** Fluid simulations of glow discharges: Effect of metastable atoms in argon // J. Appl. Phys. — 1993. — V. 73, № 8 (15 April 1993). — P. 3668–3679.
2. **Ткачев А.Н., Феденев А.А., Яковленко С.И.** Коэффициент Таунсенда, кривая ухода и эффективность формирования пучка убегающих электронов // Журнал технической физики. — 2007. — Т. 77, Вып. 6. — С. 22–27.
3. **Смирнов Б.М.** Возбужденные атомы. — М.: Энергоиздат, 1982. — 232 с.
4. **Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Чебакова В.Ю., Шнейдер М.Н.** // Моделирование высокочастотного емкостного разряда при больших межэлектродных расстояниях. I. Постановка задачи // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. — 2013. — Т. 155, Кн. 2 — С. 123–130.
5. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 592 с.
6. **Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С.** Трансформация компонентов воздушной атмосферы в зоне искрового разряда при анодной поляризации нависающего над раствором металлического электрода // Журнал технической физики. — 2013. — Т. 83, Вып. 3. — С. 54–60.

REFERENCES

1. **Dimitris P. Lymberopoulos and Demetre J. Economou.** Fluid simulations of glow discharges: Effect of metastable atoms in argon // J. Appl. Phys. — 1993. — V. 73, № 8 (15 April 1993). — P. 3668–3679.
2. **Tkachyov A.N., Fedenev A.A., Yakovlenko S.I.** Townsend's coefficient, curve of leaving and formation of runaway electron bunch efficiency in argon // Technical Physics. — 2007. — V. 77, № 6. — P. 22–27.
3. **Smirnov B.M.** Excited atoms [Vozbuzdennyye atomy]. — Moscow: Energoizdat, 1982. — 232 p. (in Russian)
4. **Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Chebakova V.Yu., Schneider M.N.** Modeling of a High-Frequency Capacitive Discharge with a Large Inter-Electrode Distance. I. Statement of the Problem [Modelirovanie vysokochstotnogo emkostnogo razrjada pri bol'shikh mezelektrodnykh rasstoyaniyakh. I. Postanovka zadachi] // Uchenyy Zapiski Kazanskogo Universiteta. Ser. Fiz.-Mat. Nauki. — 2013. — V. 155, № 2. — P. 123–130. (in Russian)
5. **Rayzer Yu.P.** Physics of Gas Discharges [Fizika gazovogo razryada]. — Moscow: Nauka, 1987. — 592 p. (in Russian)
6. **Orlov A.M., Yavtushenko I.O., Bodnarsky D.S.** Transformation of air atmosphere components in a spark discharge zone at anode polarization of metal electrode hanging over solution // Technical physics. — 2013. — V. 83, Issue 3. — P. 54–60.